

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250221001

## 活动断裂带结构分区对隧道错断变形特征的影响机制\*

孙鑫<sup>1,2,5</sup>, 李建贺<sup>3,4</sup>, 崔臻<sup>1,2</sup>, 盛谦<sup>1,2</sup>, 尹敬涵<sup>1,2</sup>, 张茂础<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 4. 水利部水网工程与调度重点实验室, 湖北 武汉 430010; 5. 宁波市北仑区城市安全运行中心, 浙江 宁波 315800)

**摘要:** 活动断裂带产生的永久位移会导致穿越其中的隧道衬砌发生严重变形。为了探究断裂带内部结构分区对隧道衬砌错断变形的影响, 总结归纳了一种包括上下盘、破碎带、断裂带核部和破裂面的断裂带错断概化模型, 通过改变断裂带不同区域岩体力学参数、断裂带不同区域宽度以及破裂面出现位置, 开展围岩-衬砌隧道的数值试验, 测算纵向位移梯度、纵向位移曲率和椭圆度来表征纵向剪切变形、纵向弯曲变形和横断面变形。研究衬砌的纵向变形和横断面变形规律, 揭示错断作用下断裂带结构分区对隧道衬砌变形的控制机制。结果表明: (1) 断裂带错断作用下, 衬砌纵向位移曲线呈“S”型, 大部分位移集中在断裂带核部。断裂带核部的剪切变形大于其它区域, 峰值发生在破裂面处, 弯曲变形主要发生在岩体软硬交界面附近; (2) 衬砌横断面变形由隧道纵向的剪切和弯曲共同作用产生, 断裂带核部处的变形显著大于破碎带, 破裂面附近和软硬岩体交界区域需重点关注; (3) 分区岩体软硬程度差距越大和断裂带核部宽度占断裂带总宽度越小时, 断裂带核部区内衬砌纵向变形与横断面变形越剧烈。当破裂面发生在断裂带核部中央时, 衬砌纵向变形与横断面变形最剧烈, 而破裂面处于断裂带核部与破碎带分界面处, 破裂面导致的破坏范围有所增加。

**关键词:** 断裂带结构分区; 断裂带错断; 衬砌变形; 位移梯度; 位移曲率; 椭圆度; 数值分析

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1125-14

### Influence Mechanisms of Structural Zoning of Active Fault Zones on Dislocation and Deformation Characteristics of Tunnel Liners

SUN Xin<sup>1,2,5</sup>, LI Jianhe<sup>3,4</sup>, CUI Zhen<sup>1,2</sup>, SHENG Qian<sup>1,2</sup>, YIN Jinhan<sup>1,2</sup>, ZHANG Maochu<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 4. Key Laboratory of Water Grid Project and Regulation of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 5. Beilun District Urban Safety Operation Center, Ningbo 315800, China)

**Abstract:** Permanent displacement caused by active fault zones can lead to serious deformation of tunnel liners passing through them. To explore the influence of internal structural zoning of fault zones on

\* 收稿日期: 2025-02-21; 修回日期: 2025-05-11

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFB2390400)、中国科学院前瞻战略科技先导专项(XDA0420303)资助

作者简介: 孙鑫(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事隧道与地下工程方面的研究。E-mail: sunxin22@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 崔臻(1986—), 男, 研究员。主要从事强震区地下工程稳定性评价研究。E-mail: zcui@whrsm.ac.cn

the dislocation deformation of tunnel liners, this study summarized a generalized model for fault zone dislocation including the hanging wall, footwall, fracture zone, fault zone core, and rupture surface. By changing the mechanical parameters of rock mass in different zones of the fault, the width of different fault zones, and the location of the rupture surface, numerical experiments on the surrounding rock-tunnel liner were conducted. The longitudinal displacement gradient, longitudinal displacement curvature, and ellipticity were measured to characterize longitudinal shear deformation, longitudinal bending deformation, and cross-sectional deformation. The longitudinal and cross-sectional deformation patterns of the liner were investigated, and the controlling mechanisms of fault zone structural zoning on tunnel liner deformation under fault dislocation were revealed. The results showed that: (1) under fault zone dislocation, the longitudinal displacement curve of the liner exhibited an "S" shape, with most displacements concentrated in the fault zone core. The shear deformation in the fault core zone was larger than that in other zones. The peak value occurred at the rupture surface, and the bending deformation mainly occurred near the interface between soft and hard rock masses. (2) The cross-sectional deformation of the liner was caused by the combined action of longitudinal shear and bending. The deformation in the fault zone core was significantly larger than that in the fracture zone. Special attention should be given to areas near the rupture surface and the interface between soft and hard rock masses. (3) The larger the difference in hardness between soft and hard rock masses in different zones and the smaller the ratio of fault core width to the total fault zone width, the more severe the longitudinal deformation and cross-sectional deformation of the liner located in the fault zone core. When the rupture surface occurred at the center of the fault zone core, the longitudinal deformation and cross-sectional deformation of the liner were the most severe. When the rupture surface was located at the interface between the fault zone core and the fracture zone, the damage range caused by the rupture surface increased.

**Keywords:** fault zone structural zoning; fault zone dislocation; liner deformation; displacement gradient; displacement curvature; ellipticity; numerical analysis

## 0 引言

随着国家交通运输发展规划的推进和水网建设的不断深入,我国西部地区将建设愈来愈多的长距离地下线性工程,然而该地区的地质构造复杂,且区域地震活动强烈,已有和在建地下工程常常不可避免地穿越活动断裂带。断裂带作为地壳岩石承受超强构造应力下发生破裂并沿破裂方向发生明显滑移的一种构造<sup>[1]</sup>,在长期的地质活动中发育、扩展与演化,呈现为有一定宽度的内部结构复杂的三维地质结构体<sup>[2-3]</sup>,故断裂带错动造成的永久性位移沿纵向并不均匀,而这种不均匀位移会对穿越其中隧道衬砌造成局部变形破坏<sup>[4-5]</sup>,严重影响地下工程的安全运营(图1),因此对断裂带范围内隧道衬砌的变形分析是研究工程抗错断问题的关键。

现阶段,国内外学者<sup>[6-9]</sup>对活动断裂带错动导致



图1 大梁隧道震害

Fig.1 Earthquake damage in Daliang tunnel

隧道衬砌变形已经开展了大量研究。其中,在解析方法上,为考虑穿越活动断裂带隧道错断后可能发生的不均匀位移模式,张翔宇等<sup>[10]</sup>基于“S”型、上凸型、下凹型3种位移曲线推导了隧道节段转角位移公式。刘国钊等<sup>[11]</sup>考虑断裂带围岩力学性质的差异,沿隧道纵向将断裂带分成错动影响区、过渡影响区和非影响区,研究了地基参数和断裂带宽度对隧道纵向变形响应的的影响机制。此外,X. Zhang等<sup>[12]</sup>考虑了断裂带内隧道-地层沿纵向的非线性相互作用和断裂带整体宽度,给出了隧道纵向变形的

非线性精细解。在模型试验方法上,刘学增等<sup>[13]</sup>最早将断裂带围岩按均匀介质考虑,基于此开展了黏滑错动下跨断层公路隧道的模型试验,得到了隧洞衬砌的变形响应特征。进一步地,周光新等<sup>[14]</sup>将围岩分为上下盘和断层带的“硬—软—硬”结构,开展隧道模型试验,研究了隧洞与断层带交角、隧洞直径和隧洞断面形式等参数对衬砌结构变形破坏的影响机制。刘小岩等<sup>[15]</sup>则将断层概化为上下盘和破碎带进行隧道模型试验,分析发现断层蠕滑错动下隧道轴线方向的岩体位移曲线呈现出似“S”形。在数值模拟方法上,孙飞等<sup>[16]</sup>将断裂带简化为破裂面,模拟分析了断层错动下隧道衬砌的变形规律,结果表明变形主要集中在破裂面附近。进一步地,C. Q. Zhang等<sup>[17]</sup>在断裂带内部被分为破碎带和影响带的基础上,考虑了破碎带和影响带之间存在一个过渡区域,建立数值模型,研究发现断裂带错动下的隧洞纵向位移曲线呈现为“S”型,与将断裂带考虑为均匀介质的隧道位移曲线有显著差异。马亚丽娜等<sup>[18]</sup>认为围岩并非简单的等效连续体,将三维离散—连续耦合方法引入跨活动断裂隧洞衬砌抗错断的研究,模拟分析了断裂带错动作用下衬砌的内力响应。

此外,前人研究发现钢管道发生纵向变形的过程中,会产生指向隧道横断面直径方向的附加内力,进而导致横断面压扁<sup>[19]</sup>。为考虑上述效应,廖少明<sup>[20]</sup>将纵向变形条件下的横断面变形总结为横断面的压扁和翘曲。张冬梅等<sup>[21]</sup>进一步使用双曲线和指数型曲线来表征隧道的纵向位移曲线,分析了两种纵向位移模式下衬砌横断面的变形规律。汪振等<sup>[22]</sup>研究了走滑断层错动下隧道关键断面的变形特征,发现隧道横断面变形最为严重的区域在断裂带中部,并随着断裂带宽度增加,断裂带中部的隧道截面变形程度减小。

前人的研究成果<sup>[23-25]</sup>虽较为丰富,但并未厘清断裂带内部的复杂结构,大多数研究仅考虑断裂带岩体与上下盘岩体的物理力学性质的不同,而将断裂带内部按均匀介质考虑,这与工程实践中揭示出来的断裂带内部结构不相符合,导致了穿越活动断裂带的隧道衬砌纵向错断变形特征这一关键问题研究尚不够深入。此外,研究表明隧道衬砌的横断面变形依赖于其纵向变形,所以断裂带结构分区对隧道横断面错断变形的影响规律也待研究。

基于此,本文首先总结活动断裂带内部结构的特征,提出断裂带内部结构分区的错断概化模型。

其次,通过计算隧道衬砌的纵向位移梯度、纵向位移曲率以及横断面的椭圆度来表征隧道衬砌沿纵向的剪切变形、弯曲变形和横断面变形的剧烈程度,并对断裂带内软硬岩体物理力学参数、软硬岩体宽度以及破裂面出现在断裂带核部的位置等参数展开敏感性分析,总结错断作用下隧道衬砌变形特征和断裂带结构分区对隧道衬砌变形的影响规律,本文研究成果拟为穿越活动断裂带的隧道抗断设计和施工提供重要参考。

## 1 断裂带地质特征和数值建模

### 1.1 断裂带内部结构

地质数据、地震勘探及测井等研究资料<sup>[26-28]</sup>表明断裂带是一种复杂的三维地质体,其内部岩体的分布呈现高度结构化特征。目前,断裂带内部岩体分布及结构特征的研究普遍采用分区分带的方法展开<sup>[29-30]</sup>,该方法基于断裂带内岩体的力学性质、变形程度和裂隙密度等差异,以距应力集中区的距离作为划分范围的轴线,将断裂带内部分为不同的区域。

尽管学界对断裂带内部结构划分还未存在统一标准(如滑动破碎带/诱导裂缝带<sup>[31-32]</sup>、断层核/破碎带<sup>[1,2,28]</sup>),但建立的“核部-破碎带”二元结构体系<sup>[26,27,30,33-35]</sup>(图2)已形成广泛共识:核部作为高应变集中区(宽度较小),发育断层泥、糜棱岩等低强度岩体;破碎带作为过渡区具有大范围延伸特征(宽度可达数十上百米),其裂隙网络发育导致强度衰减(抗压强度低于母岩)但保持母岩基质特性<sup>[2-3]</sup>。

此外,断裂带内受到地层岩性、温度条件和应力性质等多种环境因素的影响,断裂带核部和破碎带内部物质的物理力学参数和软硬岩体宽度等都

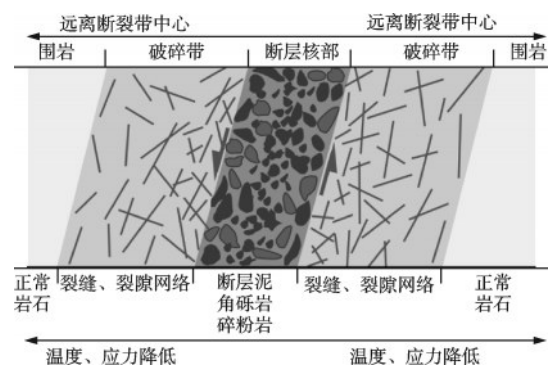


图2 断裂带核部和破碎带示意

Fig.2 Schematic diagram of core and fracture zone of fault zone

不尽相同<sup>[28,30,36-37]</sup>。尤其在地震作用下,破裂面出现的位置更是随机的,勘察设计阶段推定破裂面出现在应力最集中、力学性质最软弱的区域,但在整个断裂带核部内破裂面都有很高概率出现。

为了展开活动断裂带结构分区对隧道衬砌错断变形的控制机制研究,本文将断裂带错断概化模型(图3)分为四个主要部分:上下盘、破碎带、断裂带核部和破裂面。其中,上下盘岩体较为完整,岩体力学性质良好,可视为半无限长区域;断裂带核部则位于应力集中区域,由断层泥、糜棱岩等构成,岩体力学性质脆弱但变形能力强;破碎带位于上下盘与断裂带核部之间,岩体富含裂缝和微裂隙,其岩体力学性质介于上下盘与断裂带核部之间;破裂面可视为断裂带核部内力学性质最弱的断层泥区域。

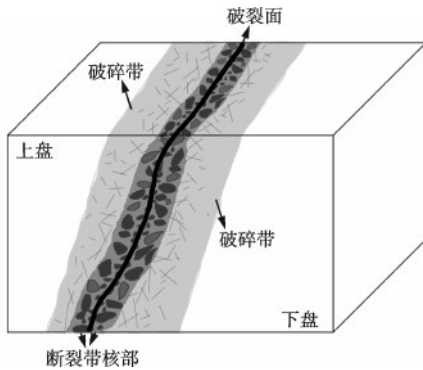


图3 断裂带错断概化模型

Fig.3 Generalized model of fault zone dislocation

模型建立了“完整围岩→破碎带→断裂带核部”的断裂带内部结构分区,用以表征断裂带内部岩体力学参数梯度变化。

## 1.2 数值建模

本文计算原型参考西部某隧道工程穿越活动断裂带,断裂带总宽度为180 m,断裂带核部宽度为50 m,断裂带倾角为88°,倾向为216°,考虑设防水平方向位错量值为2 m,上述参数来自隧道工程的地质勘察资料。基于FLAC3D软件构建一个长600 m,宽125 m,高175 m的围岩-衬砌三维数值模型,如图4所示,其Y轴为隧道轴线方向。隧道设计采用近似圆形断面形式,半径为7 m。为简化计算,隧道一衬与二衬合并为1 m厚度的C30混凝土衬砌。模型由六个部分组成,分别为断裂带核部、破碎带、破裂面、隧道衬砌和稳定的上盘及下盘,均采用应变软化模型。

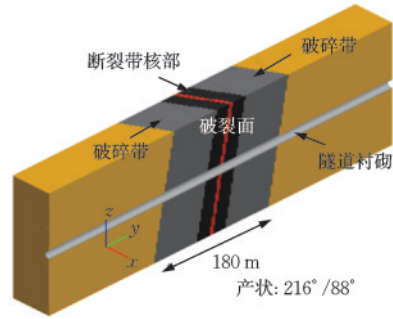


图4 隧道衬砌穿越断裂带的数值模型

Fig.4 Numerical model of tunnel liner crossing fault zone

模型中的材料参数分别对应西部某隧道工程中的衬砌材料参数和地质勘察给出的围岩物理力学参数,具体参数见表1。鉴于本文主要针对蠕滑错断,因此断裂带错动视为上盘边界上的静态加载。

表1 围岩与衬砌的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and liner

材料名称	围岩等级	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
上下盘	III	2 600	6.0	0.29	3.0	37	0.8
破碎带	IV	2 250	4.3	0.31	0.5	31	0.35
断裂带核部	V	1 650	1.0	0.35	0.2	23	0.15
衬砌	-	2 500	30.0	0.20	2.0	25	3.0

## 1.3 边界条件

根据边界条件的不同,目前断裂带错动数值模型可以分为以下三类<sup>[38-41]</sup>:(1)模型由衬砌、上盘、下盘与破碎带构成,破裂面置于破碎带中部,破裂面下盘一侧固定,破裂面上盘一侧施加均布位错(图5(a));(2)模型由衬砌、上盘、下盘与破碎带构成,破裂面置于破碎带中部,下盘固定,上盘围岩施加均布位错,上盘错动位移会传递至破碎带使其发生错动变形(图5(b));(3)模型由衬砌、上盘、下盘与破碎带构成,破裂面置于破碎带中部,下盘围岩固定,上盘围岩施加均布位错的同时,亦在破碎带施加不均匀位错(图5(c))。

## 1.4 物理模型试验验证

为了验证数值模拟的有效性以及选择合适的边界条件,本文根据周光新等<sup>[14]</sup>开展的断裂带错动作用下隧道衬砌变形物理模型实验(图6),建立一

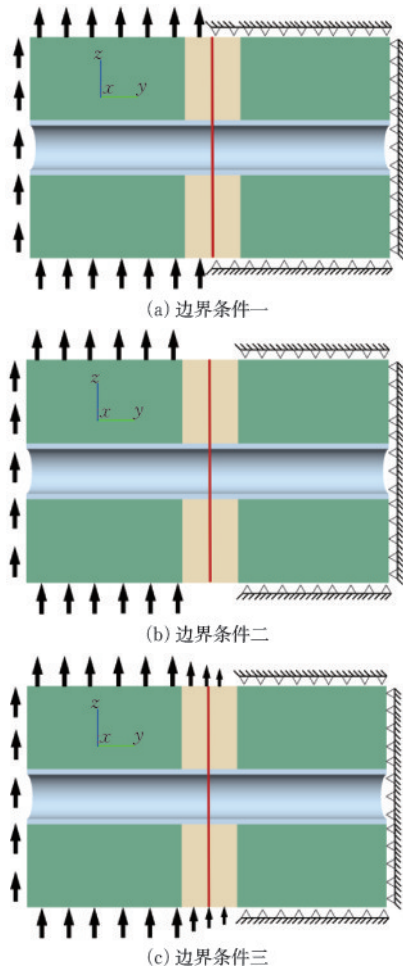


图5 不同边界条件下围岩-衬砌数值模型

Fig.5 Numerical model of surrounding rock-liner under different boundary conditions

个与模型试验等比例的数值模型(图7)。分别按照图5中3种边界条件开展数值模拟。模型隧道长度为60 cm,隧道与断裂带夹角 $90^\circ$ ,断裂带宽度10 cm,衬砌厚度1 cm,断裂带直径为10 cm。等比例数值模型的材料参数见表2。围岩采用应变软化模型,衬砌采用莫尔库仑塑性模型。

图8展示了断裂带错动50 mm时数值模拟衬砌应变与物理模型试验衬砌应变的对比。虽然在物

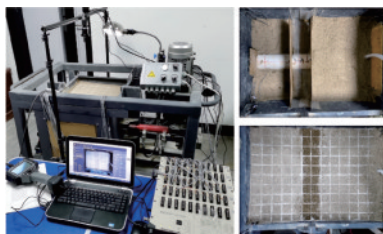


图6 走滑断层物理模型实验<sup>[14]</sup>

Fig.6 Physical model experiment of strike-slip fault<sup>[14]</sup>

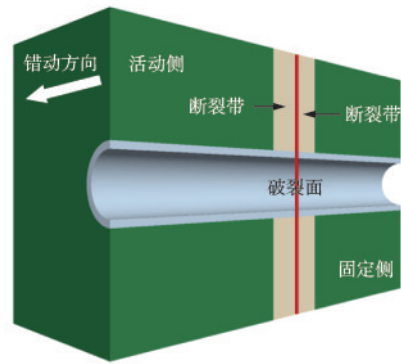


图7 等比例数值模型

Fig.7 Equivalent-scale numerical model

表2 围岩与衬砌的物理力学参数(等比例数值模型)

Table 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and liner (equivalent-scale numerical model)

材料名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松 比	黏聚力/摩擦角/抗拉强度/ MPa	( $^\circ$ )	MPa
上下盘	2 600	0.15	0.29	0.006	37	0.005
断裂带	1 900	0.1	0.25	0.005	25	0.001
衬砌	1 000	0.28	0.28	0.006	30	-

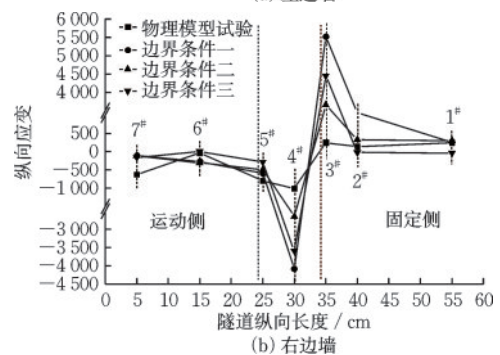
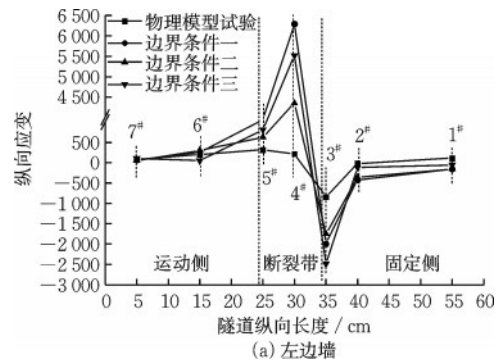


图8 物理模型试验与数值模拟衬砌纵向应变对比

Fig.8 Comparison of longitudinal strain of liner between physical model test and numerical simulation

理模型试验和数值模型实验中,衬砌的纵向应变值存在差异,但是模型试验和数值模拟的结果均显示出衬砌的纵向应变分布趋势基本一致。在代表三

种边界条件的数值模型中,与物理模型试验中衬砌的纵向应变相比,边界条件二的数值模拟在纵向应变数值上的差距最小。因此,在后续分析中,使用边界条件二模拟断裂带错动。

## 2 断裂带错动作用下衬砌变形特征

### 2.1 衬砌纵向变形特征

图9为衬砌的纵向位移曲线,呈现为典型的“S”型模式,由图9可知,纵向位移大部分集中在范围较小的断裂带核部,少部分则分散在断裂带核部两侧的破碎带。这是由于断裂带核部岩石强度较低,破碎程度高,在受到错断作用时,容易发生较大的变形。而破碎带内的岩石虽然裂缝密度高,但并未形成连续的软弱带,区域内变形能力弱于断裂带核部。此外,断裂带核部与破碎带交界处的位移梯度会出现明显突变。

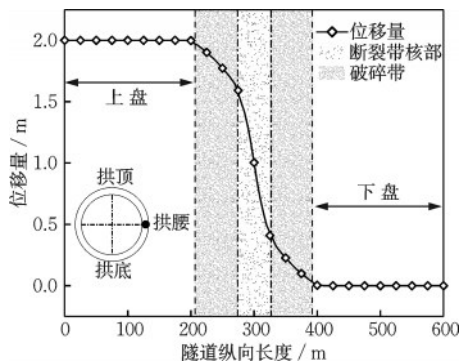


图9 隧道衬砌纵向位移

Fig.9 Longitudinal displacement of tunnel liner

上述隧道衬砌的纵向位移主要由两种运动模式构成,如图10所示,包括剪切错动模式和弯曲转动模式。剪切错动会导致隧道衬砌产生剪切变形,弯曲转动会导致隧道衬砌产生拉压变形。通过计算,可求得用于表征上述两种纵向变形的指标。(1)位移梯度:单位里程内错断方向的位移量,即 $dw_F/dy$ ,用来

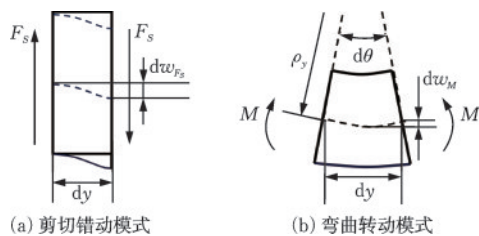


图10 隧道衬砌纵向运动模式

Fig.10 Longitudinal movement mode of tunnel liner

表征隧道衬砌剪切变形的程度。(弯曲转动引起的错断方向位移量 $d\tau_M$ 远小于剪切错动引起的错断方向位移量 $d\tau_F$ ,可以忽略);(2)位移曲率:单位里程内位移曲线切线方向角的转动量,即 $d\theta/dy$ ,用来表征隧道衬砌弯曲转动产生拉压变形的程度。

图11为隧道衬砌的纵向位移梯度曲线。观察图11易知,在整个断裂带内,位移梯度呈V型分布。自上盘至下盘,位移梯度的绝对值呈先增大后减小的趋势;当远离破碎带向上下盘方向延伸至一定范围时,位移梯度值逐渐衰减直至为0。断裂带核部的位移梯度值明显高于破碎带区域,且位移梯度峰值位于断裂带核部的中央。这表明当隧道衬砌穿越断裂带核部时,会面临较大的剪切变形,尤其在破裂面附近易发生剪切破坏。这与大梁隧道破坏特征相一致。

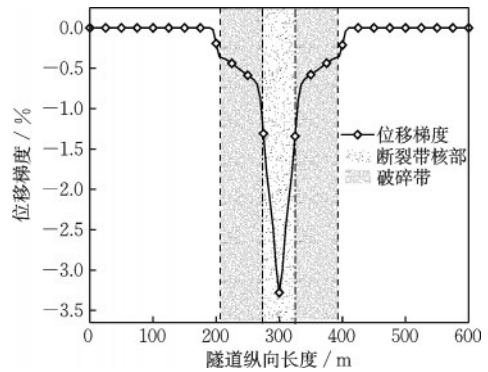


图11 隧道衬砌纵向位移梯度

Fig.11 Longitudinal displacement gradient of tunnel liner

图12为隧道衬砌纵向位移曲率曲线。观察图12可知,在整个破裂带内,位移曲率呈类似倒S型分布。位移曲率在断裂带核部中心附近为0,随着与断裂带核部中心的距离逐渐增大,位移曲率绝对值先快速攀升,而后呈减小趋势,在远离破碎带并

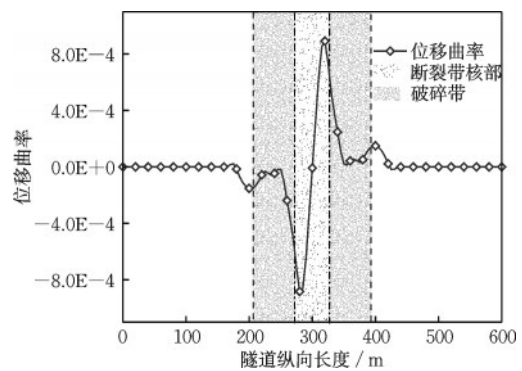


图12 隧道衬砌纵向位移曲率

Fig.12 Longitudinal displacement curvature of tunnel liner

向上下盘扩展的一定范围内,曲率值先小幅上升而后衰减为0;位移曲率峰值出现在断裂带核部与破碎带的交界处,并在破碎带与上下盘的交界处出现局部极值。这表明在断裂带的软硬岩体交界处,隧道衬砌面临发生弯曲破坏的风险。

## 2.2 衬砌横断面变形特征

隧道衬砌在断裂带错断作用下产生弯曲转动和剪切错动。其中,弯曲转动引起隧道衬砌沿纵向产生转角,横断面所受的拉压应力按照其产生的转角被分解为轴线方向应力和错动方向应力<sup>[21]</sup>,错动方向应力使衬砌横断面发生变形,其分布模式和大小显著受到距中性轴高度的影响,分布形式如图13所示。

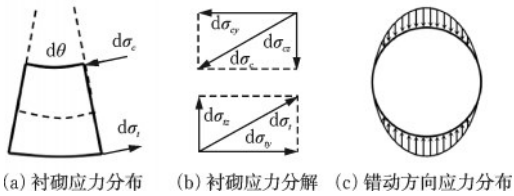


图13 弯曲转动下衬砌横断面荷载分布示意

Fig.13 Schematic diagram of load distribution of liner cross-section under bending rotation

由图14可知,当隧道衬砌受剪切错动时,为使衬砌任意横断面的错动方向荷载平衡,横断面两侧会产生不平衡剪切力。这种不平衡剪切力在纵向上可以被分解为两个组成部分,即整体剪切的 $Q + dQ/2$ 以及局部剪切的 $dQ/2$ 。前者产生纵向整体剪切变形,根据材料力学原理,其对横断面变形影响可以忽略不计,而后者与外荷载平衡时产生局部挠曲使得横断面产生变形<sup>[42]</sup>。

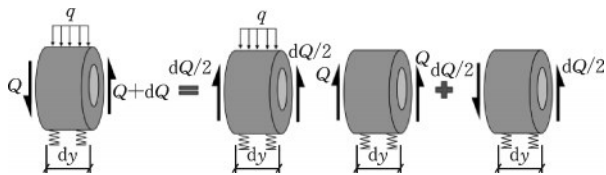


图14 隧道衬砌纵向剪切平衡示意

Fig.14 Schematic diagram of longitudinal shear balance of tunnel liner

断裂带错断作用下隧道衬砌横断面变形后其轮廓近似椭圆,以错断方向的横断面通径为短轴,与错断方向相垂直方向的横断面通径为长轴,计算横断面椭圆度 $e$ 来评价隧道衬砌横断面的变形程度。当 $e$ 越趋近于0,变形后横断面与初始断面相似

程度越高。

$$e = (d_v - d_h) / d \quad (1)$$

式中, $d_v$ 为隧道衬砌横断面的长轴长度; $d_h$ 为隧道衬砌横断面的短轴长度; $d$ 为隧道衬砌的初始直径。

依据式(1),得到衬砌横断面沿纵向的椭圆度分布曲线。观察图15可知,椭圆度的峰值出现在断裂面附近,断裂带核部内的椭圆度自断裂面向上下盘方向逐渐减小;破碎带内的椭圆度向上下盘方向逐渐增大,离开断裂带后逐渐衰减至0;断裂带核部椭圆度显著大于破碎带。断裂带核部内椭圆度曲线分布规律与位移梯度曲线分布规律相似,这说明断裂带核部内剪切是隧道衬砌横断面变形的主要因素,而椭圆度在破碎带内分布规律恰好与位移梯度曲线分布规律相反,这与弯曲作用有关。在盾构隧道验收规范的相关要求中,隧道衬砌的椭圆度峰值不得超过0.5%,而断裂带核部与断裂带靠近上下盘附近已超过容许值,需要在设计和施工时重点考虑。

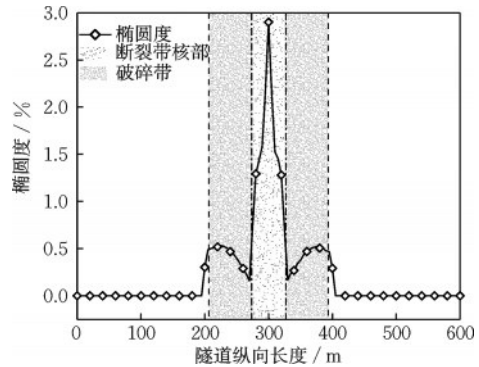


图15 衬砌横断面沿轴向的椭圆度

Fig.15 Ellipticity of tunnel liner cross-section along axial direction

## 3 断裂带结构分区参数影响分析

### 3.1 断裂带结构分区参数对隧道衬砌纵向变形的影响

根据隧道衬砌纵向位移梯度和位移曲率分布特征可知,断裂带结构分区对隧道衬砌纵向变形具有显著影响。断裂带结构分区参数包括断裂带几何参数和断裂带物理力学参数。断裂带几何参数包括断裂面所出现的位置,断裂带内断裂带核部宽度与破碎带宽度占断裂带总宽度比重(断裂带总宽度=断裂带核部宽度+破碎带宽度)。由于围岩等级的不同,断裂带物理力学参数亦不相同,同等级围岩参数

在一定范围内亦有强弱差异。本文根据规范<sup>[43-45]</sup>进行相应取值开展断裂带物理力学参数影响分析。

### 3.1.1 断裂带不同分区的物理力学参数

受断裂演化以及后期赋存环境的影响,断裂带内部各分区(上下盘、破碎带、断裂带核部和破裂面区域)的岩体物理力学参数呈现出一定程度的差异<sup>[46]</sup>。软硬岩体的物理力学参数确定手段主要有室内试验、原位试验、工程类比及参照规范等。本文为了探讨岩体力学参数变化产生的影响,采用参照规范<sup>[43-45]</sup>对各分区内岩体力学参数进行取值进而展开研究。

国内主要地下工程设计标准包括《工程岩体分级标准》<sup>[43]</sup>(GB/T 50218—2014)、《公路隧道设计规范》<sup>[44]</sup>(JTG 3370.1—2018)和《铁路隧道设计规范》<sup>[45]</sup>(TB 10003—2016)等。分析表2可知,三个规范对于断裂带内部岩体的参数取值较为相似。IV级围岩的参数基本一致,V级围岩除弹性模量外,其余的参数基本被《工程岩体分级标准》<sup>[43]</sup>的参数选取范围所包括。故本文采用《工程岩体分级标准》<sup>[43]</sup>对断裂带各区域内物理力学参数取值范围进行规定从而开展参数敏感性研究。

表2 规范内断裂带围岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock in fault zone according to codes

规范名称	围岩等级	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
《工程岩体分级标准》 <sup>[43]</sup>	IV	22.5~24.5	1.3~6	0.3~0.35	27~39	0.2~0.7
	V	<22.5	<1.3	>0.35	<27	<0.2
《公路隧道设计规范》 <sup>[44]</sup>	IV	22.5~24.5	1.3~6	0.3~0.35	27~39	0.2~0.7
	V	17~22.5	<1.3	0.35~0.45	20~27	0.05~0.7
	VI	15~17	<1	0.4~0.5	<20	<0.2
《铁路隧道设计规范》 <sup>[45]</sup>	IV	20~23	1.3~6	0.3~0.35	27~39	0.2~0.7
	V	17~20	1~2	0.35~0.45	20~27	0.05~0.2

基于表3的材料参数建立若干工况,选取断裂带核部内隧道衬砌的纵向位移量、断裂带内隧道衬砌的纵向位移梯度和位移曲率作为指标进行影响规律研究。

表3 数值模拟不同工况的材料参数

Table 3 Material parameters for numerical simulation under different conditions

材料名称	围岩等级	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
Ⅲ区	Ⅲ	2 600	7.0	0.28	3.0	37
Ⅱ区-1	Ⅳ	1 950	1.5	0.33	0.4	27
Ⅱ区-2	Ⅳ	2 050	3.0	0.32	0.5	29
Ⅱ区-3	Ⅳ	2 150	4.5	0.31	0.6	31
Ⅱ区-4	Ⅳ	2 250	6.0	0.30	0.7	33
I区	V	1 650	1	0.36	0.2	23

为简述分区名称,将断裂带核部称为I区,破碎带称为II区,上下盘称为III区,下文沿用此命名方式。

为研究I区和II区的物理力学参数对于隧道衬砌纵向位移和变形的影响规律,本文以断裂带核部和破碎带的岩体弹性模量之比 $\alpha$ 来代表各分区岩体物理力学性质的差异,其它物理力学参数参照规

范<sup>[43-45]</sup>建议值范围进行取值。

$$\alpha = E_{II} / E_I \quad (2)$$

式中, $E_I$ 为断裂带核部弹性模量; $E_{II}$ 为破碎带弹性模量。

保持 $E_I$ 不变,通过不断改变 $E_{II}$ 来实现 $\alpha$ 的变化。 $\alpha$ 取1.5、3、4.5和6,依据表3选取I区、III区和四个不同的II区材料参数建立数值模型。观察图16可知,当断裂带发生相同的位错量时,各分区不同物理力学参数下纵向位移曲线均呈S型,其中I区位移量分别为0.699 4、0.796 1、1.182 4、1.282 1 m。随着 $\alpha$ 的线性增大,II区的围岩约束能力增强,岩体力学性质相对弱的I区更易发生位移,I区位移量呈S型模式增加。

如图17和图18所示,位移梯度和位移曲率的分布趋势在不同的计算工况下是相似的,但随着 $\alpha$ 的增大,最大位移梯度和最大位移曲率也随之增加,其中最大位移梯度从1.74%增加到3.76%,最大位移曲率从0.3‰到1.14‰。II区岩体力学性质不断增强,使得隧道衬砌的剪切变形更多的分布在力学性质更弱的I区,剪切变形在I区不断增大而在II区不断减小。当I区和II区的岩体力学性质差距增大时,II区和III区岩体力学性质差距减小,I区和II区交界面附近的衬砌弯曲变形增大,而II

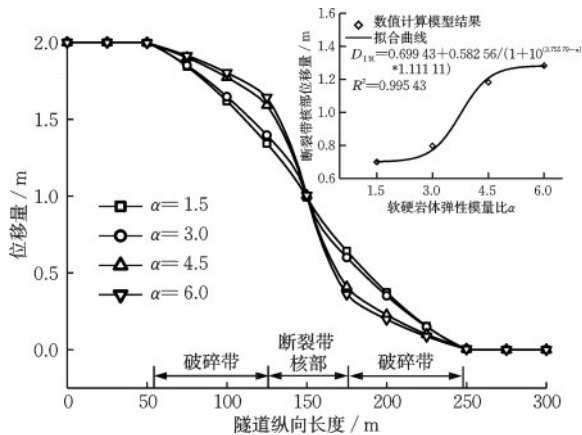


图 16 各分区不同物理力学参数下隧道衬砌纵向位移  
Fig.16 Longitudinal displacement of tunnel liner under different physical and mechanical parameters in each zone

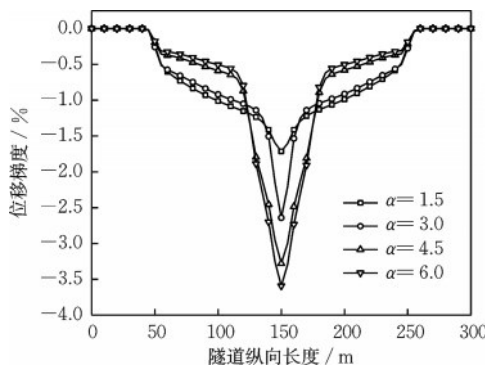


图 17 各分区不同物理力学参数下隧道衬砌纵向位移梯度  
Fig.17 Longitudinal displacement gradient of tunnel liner under different physical and mechanical parameters in each zone

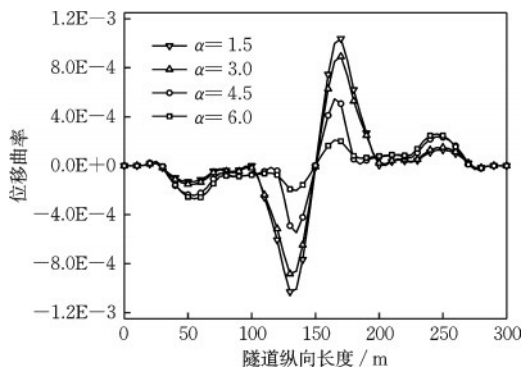


图 18 各分区不同物理力学参数下隧道衬砌纵向位移曲率  
Fig.18 Longitudinal displacement curvature of tunnel liner under different physical and mechanical parameters in each zone

区和Ⅲ区交界面附近的衬砌弯曲变形减小,弯曲变形受制于交界面两侧岩体物理力学参数的差异。

### 3.1.2 断裂带不同的分区宽度

断裂带分区宽度描述了断裂带的有限空间状

态。断裂带核部与破碎带的宽度一定程度上具有不确定性,通过固定断裂带总宽度,调整分区宽度比例设计数值实验展开影响研究。本文以西部某隧道工程穿越活动断裂带的项目资料为原型展开分析,保持断裂带总宽度(断裂带总宽度=断裂带核部宽度+破碎带宽度)不变,改变断裂带核部宽度与破碎带宽度大小来研究Ⅰ区和Ⅱ区的宽度对隧道衬砌纵向位移和变形的影响机制,以断裂带核部宽度和破碎带宽度之比 $\beta$ 来代表各分区宽度的差异。

$$\beta = w_{II} / w_I \quad (3)$$

式中, $w_I$ 为断裂带核部宽度; $w_{II}$ 为破碎带宽度。

保持断裂带总宽度不变,通过改变 $w_I$ 和 $w_{II}$ 实现 $\beta$ 的变化。 $\beta$ 取2、4、6和8,依据表3提供的材料参数选取Ⅰ区、Ⅱ区-3和Ⅲ区建立四个工况。由图19可知,当断裂带发生相同的位错量时,各分区不同宽度下位移曲线均呈S型,其中Ⅰ区位移量分别为1.4113、1.0394、0.8709、0.6695m。随着 $\beta$ 线性减小,易发生位移的Ⅰ区宽度也随之减小,Ⅰ区位移量呈倒函数模式减少。

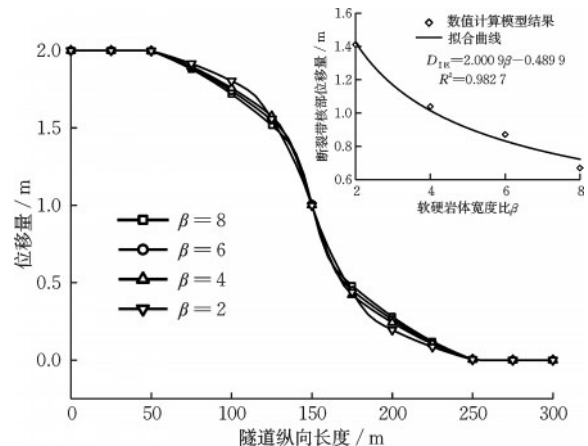


图 19 各分区不同宽度下隧道衬砌纵向位移  
Fig.19 Longitudinal displacement of tunnel liner under different widths in each zone

如图20和图21所示,纵向位移梯度和位移曲率的分布趋势在不同的计算工况下是相似的,但随着 $\beta$ 增大,最大位移梯度和最大位移曲率也随之增加,其中最大位移梯度从2.89%增加到3.92%,最大位移曲率从0.6‰到1.98‰。当岩体力学性质较弱的Ⅰ区宽度不断增大时,使得隧道衬砌的剪切错动和弯曲转动在更大范围内发生,剪切变形峰值在Ⅰ区不断减小,软硬交界面的弯曲变形也随之减少。

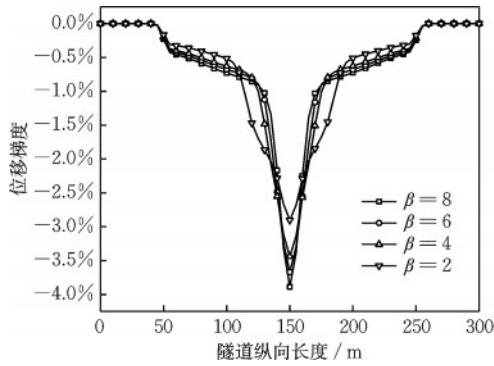


图 20 各分区不同宽度下隧道衬砌纵向位移梯度

Fig.20 Longitudinal displacement gradient of tunnel liner under different widths in each zone

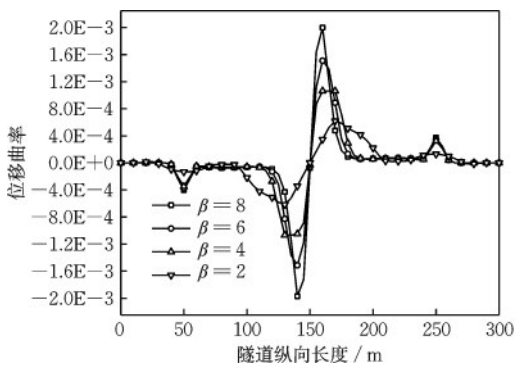


图 21 各分区不同宽度下隧道衬砌纵向位移曲率

Fig.21 Longitudinal displacement curvature of tunnel liner under different widths in each zone

### 3.1.3 破裂面在断裂带核部的不同位置

破裂面在断裂带内出现的位置具有不确定性, 大概率会出现断裂带核部。为了研究破裂面在断裂带核部出现的位置对隧道衬砌纵向位移和变形的影响机制, 考虑破裂面发生在断裂带核部紧邻上盘侧边缘、断裂带核部中央和断裂带核部紧邻下盘侧边缘这三个位置, 依据表 3 提供的材料参数选取 I 区、II 区-3 和 III 区建立三个工况。由图 22 可知, 破裂面出现在断裂带核部不同位置下隧道衬砌纵向位移曲线均呈 S 型, 曲线整体随着破裂面出现位置的移动而移动。断裂带核部发生的位移量在破裂面出现在核部中央时最大, 其位移量的 1.182 4 m, 当破裂面出现在核部的上下盘侧边缘时, 断裂带核部位移量分别为 1.095 0 m 和 1.091 4 m。

如图 23 和图 24 所示, 位移梯度和位移曲率的分布趋势在不同的计算工况下大致相同, 但随着破裂面远离断裂带核部中央区域时, 最大位移梯度从 3.31% 减少到 2.82%, 最大位移曲率从 0.76‰ 增加到 1.35‰, 位移梯度峰值与位移曲率峰值随破裂面

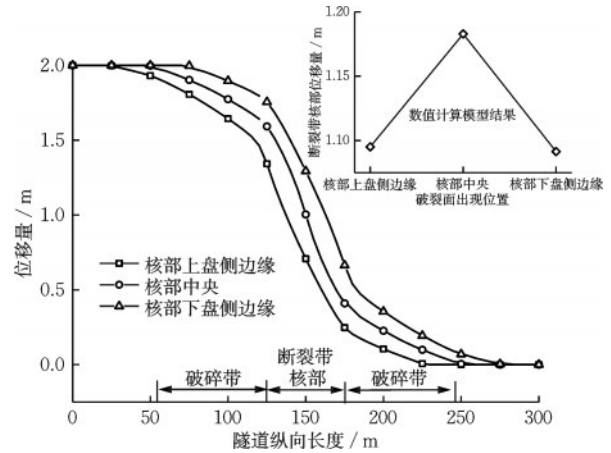


图 22 不同破裂面位置下隧道衬砌纵向位移曲线

Fig.22 Longitudinal displacement curves of tunnel liner under different rupture surface positions

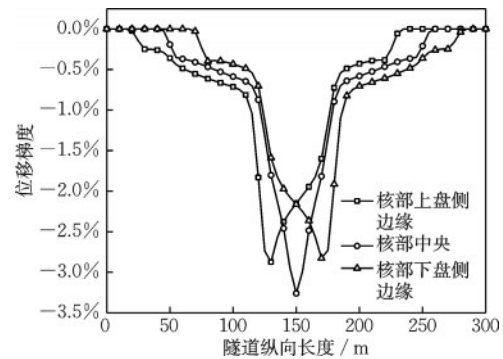


图 23 不同破裂面位置下隧道衬砌纵向位移梯度

Fig.23 Longitudinal displacement gradient of tunnel liner under different rupture surface positions

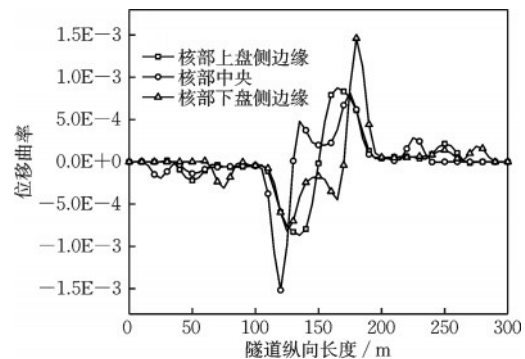


图 24 不同破裂面位置下隧道衬砌纵向位移曲率

Fig.24 Longitudinal displacement curvature of tunnel liner under different rupture surface positions

移动而移动。

破裂面附近应力最集中、最显著, 而向外则逐渐减弱直至忽略不计。当破裂面出现在断裂带核部中央时, 破裂面两侧均为力学性质较弱的 I 区, 隧道衬砌位移梯度峰值最大。而当破裂面出现在

I区和II区的交界面附近时,破裂面软侧岩体变形程度大而硬侧岩体变形程度小,位移梯度峰值则有所减小,而此处位移曲率峰值显著增大。

### 3.2 断裂带结构分区参数对隧道衬砌横断面变形的影响

依据式(3),得到断裂带结构分区参数下衬砌横断面沿轴向的椭圆度分布曲线。观察图25~27可知,随着 $\alpha$ 增加,椭圆度峰值从0.93%增大到2.96%,椭圆度超出5‰的范围随之增大。当 $\alpha$ 为3时,II区的物理力学参数与I区和III区的物理力学参数差异最大,破碎带内的椭圆度数值也最大,这与弯曲变形有关;随着 $\beta$ 增加,椭圆度峰值从2.13%增大到3.36%,椭圆度超出5‰的范围却在减少,整体破坏范围在降低,而局部破坏程度在增加;当破裂面处于断裂带核部中央时,椭圆度峰值最大,为2.93%。当破裂面处于断裂核部上下盘侧时,断裂带内椭圆度峰值各为2.45%和2.43%,而椭圆度超出5‰的范围有所增加,隧道设计时要考虑破裂面出现位置的不确定性带来的影响。

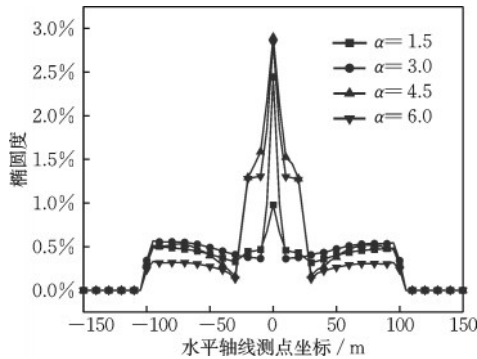


图25 各分区不同物理力学参数下隧道衬砌横断面椭圆度  
Fig.25 Ellipticity of tunnel liner cross-section under different physical and mechanical parameters in each zone

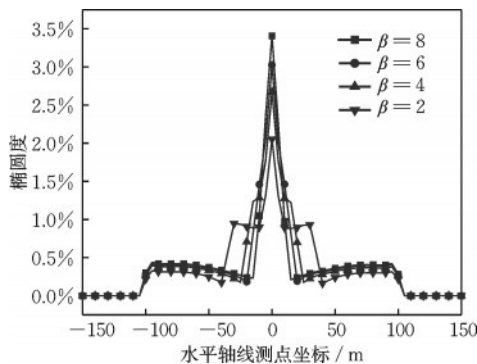


图26 各分区不同宽度下隧道衬砌横断面椭圆度  
Fig.26 Ellipticity of tunnel liner cross-section under different widths in each zone

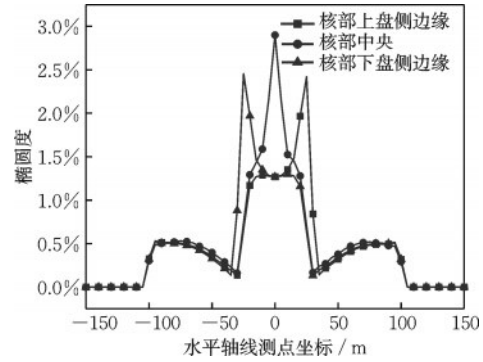


图27 不同破裂面位置下隧道衬砌横断面椭圆度  
Fig.27 Ellipticity of tunnel liner cross-section under different fracture surface positions

## 4 结论

(1) 错断作用下,隧道衬砌纵向位移曲线呈“S”型模式,且位移主要集中在力学性质脆弱的断裂带核部,少量位移则分散在断裂带核部两侧力学性质相对较好的破碎带内。

(2) 从隧道衬砌结构纵向变形特征来看,在断裂带核部区域,尤其是靠近破裂面处,结构破坏主要由剪切导致。在软硬岩体交界处,结构破坏主要表现为弯曲破坏和弯剪破坏。远离断裂带区域的隧道衬砌变形很小,几乎不受断裂带错动的影响;从隧道衬砌结构横断面变形特征来看,断裂带错动作用下隧道衬砌结构在破裂面处最先发生剪切破坏,其次在软硬岩体交界处发生弯剪破坏。断裂带核部破裂面附近、断裂带核部与破碎带交界区域以及破碎带与上下盘交界区域易发生破坏,需要在设计与施工时重点关注。

(3) 断裂带不同区域的物理力学参数、断裂带不同区域的宽度和破裂面出现位置均影响隧道衬砌变形。随着断层不同区域物理力学参数差异和断层不同区域宽度差异增大时,隧道衬砌变形也增大。破裂面位置影响隧道衬砌最大变形位置同时也影响隧道衬砌变形范围。

### 参考文献:

- [1] Torabi A, Berg S S. Scaling of fault attributes: A review [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28 (8): 1444-1460.
- [2] Choi J H, Edwards P, Ko K, et al. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new

- methodological approach [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 152: 70-87.
- [3] Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(11): 1557-1575.
- [4] Yu H T, Zhang Z W, Chen J T, et al. Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnel liners with sharp stiffness transition [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 77: 103-114.
- [5] 黄磊, 周颜婷, 刘中宪, 等. SH波入射下山体-断层破碎带-隧道相互作用分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(4): 870-880.  
Huang L, Zhou Y T, Liu Z X, et al. Analysis of the interaction between mountains-fault zones-tunnels under SH wave incidence [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(4): 870-880. (in Chinese)
- [6] 王天强, 崔臻, 盛谦, 等. 走滑断层作用下跨断层隧洞错断模型试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(3): 597-605.  
Wang T Q, Cui Z, Sheng Q, et al. Model experimental study of the influence of strike-slip fault with dislocation on tunnel [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(3): 597-605. (in Chinese)
- [7] 乔亚飞, 肖颖鸣, 丁文其, 等. 跨断层隧道施工应力路径识别与扰动分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(1): 50-59.  
Qiao Y F, Xiao Y M, Ding W Q, et al. Identification of stress path and analysis of disturbance induced by construction of tunnel across fault [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(1): 50-59. (in Chinese)
- [8] 周光新, 崔臻, 盛谦, 等. 活动断裂错动位移模式对隧洞变形与内力的影响研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(6): 1323-1330, 1349.  
Zhou G X, Cui Z, Sheng Q, et al. Study on the deformation and internal force of the tunnel under the displacement pattern of the active fault zone [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(6): 1323-1330, 1349. (in Chinese)
- [9] Qiao Y F, Tang J, Liu G Z, et al. Longitudinal mechanical response of tunnels under active normal faulting [J]. *Underground Space*, 2022, 7(4): 662-679.
- [10] 张翔宇, 崔臻, 张延杰, 等. 穿越活动断层隧洞铰接设防宽度估算方法研究[J]. *人民长江*, 2024, 55(3): 160-168.  
Zhang X Y, Cui Z, Zhang Y J, et al. Study on estimation method of hinge fortification width of tunnel crossing active fault [J]. *Yangtze River*, 2024, 55(3): 160-168. (in Chinese)
- [11] 刘国钊, 乔亚飞, 何满潮, 等. 活动性断裂带错动下隧道纵向响应的解析解[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 923-932.  
Liu G Z, Qiao Y F, He M C, et al. An analytical solution of longitudinal response of tunnels under dislocation of active fault [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 923-932. (in Chinese)
- [12] Zhang X, Wang M N, Li Z J, et al. Mechanical response of tunnels crossing active fault zones under normal or reverse faulting: A refined nonlinear analytical approximate solution [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 167: 106028.
- [13] 刘学增, 林亮伦. 75°倾角逆断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(12): 2523-2530.  
Liu X Z, Lin L L. Research on model experiment of effect of thrust fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(12): 2523-2530. (in Chinese)
- [14] 周光新, 盛谦, 张传健, 等. 穿越走滑断层铰接隧洞抗错断设计参数作用机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(5): 941-953.  
Zhou G X, Sheng Q, Zhang C J, et al. Study on action mechanism of anti-dislocation design parameters of a tunnel with flexible joint crossing strike-slip faults [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(5): 941-953. (in Chinese)
- [15] 刘小岩, 张传庆, 史铁勇, 等. 跨活断层深埋隧道轴线错动位移模式试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(5): 1304-1312.  
Liu X Y, Zhang C Q, Shi T Y, et al. Experimental study of axis displacement mode of deep buried tunnel across active faults [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1304-1312. (in Chinese)
- [16] 孙飞, 张志强, 秦昌. 正断层错动下乌鲁木齐地铁1号线隧道结构受迫影响研究[J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(2): 54-63.  
Sun F, Zhang Z Q, Qin C. Research on influence upon tunnel structure of metro line 1 in Urumqi forced by normal fault dislocation [J]. *China Railway Science*, 2019, 40(2): 54-63. (in Chinese)
- [17] Zhang C Q, Liu X Y, Zhu G J, et al. Distribution pat-

- terns of rock mass displacement in deeply buried areas induced by active fault creep slip at engineering scale [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(10): 2849-2863.
- [18] 马亚丽娜, 盛谦, 崔臻, 等. 基于三维离散-连续耦合方法的跨活动断裂隧洞错断破坏机制研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(增2): 240-245.  
Ma Y L N, Sheng Q, Cui Z, et al. Disruption and destruction mechanism of cross-active fault tunnels based on 3D discrete-continuous coupling method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup 2): 240-245. (in Chinese)
- [19] Brazier L G. On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1927, 116 (773): 104-114.
- [20] 廖少明. 圆形隧道纵向剪切传递效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.  
Liao S M. Research on the effect of longitudinal shear transfer on circular tunnel lining [D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese)
- [21] 张冬梅, 黄栩, 黄宏伟. 盾构隧道纵向变形引起的横向效应[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(2): 205-212, 272.  
Zhang D M, Huang X, Huang H W. Effect of longitudinal deflection on shield tunnel convergence [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(2): 205-212, 272. (in Chinese)
- [22] 汪振, 钟紫蓝, 黄景琦, 等. 走滑断层错动下山岭隧道关键断面变形及损伤演化[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(增1): 425-433.  
Wang Z, Zhong Z L, Huang J Q, et al. Deformation and damage evolution of key section of mountain tunnel under strike-slip fault dislocation [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup 1): 425-433. (in Chinese)
- [23] 王云潇, 张聪, 王辉, 等. 穿越断层长大深埋隧洞动力非协调变形与破坏机制[J/OL]. *防灾减灾工程学报*, 2025: 1-14. (2025-03-11). <https://link.cnki.net/doi/10.13409/j.cnki.jdpme.20241023003>.  
Wang Y X, Zhang C, Wang H, et al. Dynamic incompatible deformation and failure mechanism in a long deep buried fault-crossing tunnel [J/OL]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2025: 1-14. (2025-03-11). <https://link.cnki.net/doi/10.13409/j.cnki.jdpme.20241023003>. (in Chinese)
- [24] 史新伟, 冯新, 范哲. 逆断层作用下复合衬砌输水隧洞损伤演化分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(5): 1132-1140.  
Shi X W, Feng X, Fan Z. Damage evolution analysis of composite lining convey tunnel under reverse fault [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(5): 1132-1140. (in Chinese)
- [25] 陈之毅, 郭远鹏. 断层错动和地震动共同作用下跨断层隧道的损伤分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(1): 132-137.  
Chen Z Y, Guo Y P. Analysis of cross fault tunnel damage under combined action of fault dislocation and ground motion [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(1): 132-137. (in Chinese)
- [26] Wibberley C A J, Yielding G, Di Toro G. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: A review [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2008, 299(1): 5-33.
- [27] 龙坤. 断层强度损伤、应力场演化规律及破裂滑移特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
Long K. Research on strength damage, stress evolution and fracture slip characteristics of the fault zone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)
- [28] 陶凌云. 济阳坳陷下古生界碳酸盐岩潜山断裂带结构及控藏作用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.  
Tao L Y. Fault zone structure and reservoir control of lower Paleozoic carbonate buried hill in the Jiyang depression [D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2021. (in Chinese)
- [29] Logan J M, Dengo C A, Higgs N G, et al. Chapter 2 fabrics of experimental fault zones: Their development and relationship to mechanical behavior[C]//*Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks-A Festschrift in Honor of W. F. Brace*. Amsterdam: Elsevier, 1992: 33-67.
- [30] 宋佳佳, 孙建孟, 王敏, 等. 断层内部结构研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(5): 1956-1966.  
Song J J, Sun J M, Wang M, et al. Research progress in the internal structure of the fault [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 1956-1966. (in Chinese)
- [31] 薛少强, 张传庆, 肖成志, 等. 输水隧洞赋存活断层蠕滑位移模式研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(11): 149-155.  
Xue S Q, Zhang C Q, Xiao C Z, et al. Study on creep displacement modes of active fault where water conveyance tunnel passing through [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(11): 149-155. (in Chinese)

- [32] 周辉, 赵海涛, 李坚, 等. 香炉山隧洞龙蟠: 乔后断裂带西支蠕滑特性与位错模式[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(12): 97-104.  
Zhou H, Zhao H T, Li J, et al. Creep characteristics and dislocation mode of the west branch of longpan-Qiaohou fault in Xianglushan tunnel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(12): 97-104. (in Chinese)
- [33] Bastesen E, Braathen A. Extensional faults in fine grained carbonates - analysis of fault core lithology and thickness - displacement relationships [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11): 1609-1628.
- [34] Caine J S, Evans J P, Forster C B. Fault zone architecture and permeability structure [J]. Geology, 1996, 24(11): 1025.
- [35] 单亦先, 劳海港, 王永诗, 等. 岩性差异变化对断层带结构影响的物理模拟[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 108-112, 121.  
Shan Y X, Lao H G, Wang Y S, et al. Physical simulation of the influence of lithological differences on fault zone structure [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 108-112, 121. (in Chinese)
- [36] 林爱明. 断层岩与断层模式[J]. 高校地质学报, 1996, 2(3): 295-306.  
Lin A M. Fault rocks and faulting model [J]. Geological Journal of China Universities, 1996, 2(3): 295-306. (in Chinese)
- [37] Meng Y J, Chen H H, Luo Y, et al. Architecture of intraplate strike-slip fault zones in the Yanchang Formation, Southern Ordos Basin, China: Characterization and implications for their control on hydrocarbon enrichment [J]. Journal of Structural Geology, 2023, 170: 104851.
- [38] 马亚丽娜, 崔臻, 盛谦, 等. 正断层错动对围岩-衬砌体系响应影响的离散-连续耦合模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2088-2097.  
Ma Y L N, Cui Z, Shen Q, et al. Influences of normal fault dislocation on response of surrounding rock and lining system based on discrete-continuous coupling simulation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2088-2097. (in Chinese)
- [39] 汪振, 钟紫蓝, 赵密, 等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1876-1884.  
Wang Z, Zhong Z L, Zhao M, et al. Simulation of normal fault rupture and its impact on mountain tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1876-1884. (in Chinese)
- [40] 唐浪洲, 于丽, 王玉锁, 等. 走滑断层错动量大小对铁路隧道结构安全性影响的数值分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 214-224.  
Tang L Z, Yu L, Wang Y S, et al. Numerical analysis on the effect of strike-slip fault dislocation on the structural safety of railway tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 214-224. (in Chinese)
- [41] 祁彬溪, 王凡, 陈捷翎. 粘滑断层错动作用下穿越断层隧道结构响应数值模拟[J]. 建筑结构, 2020, 50(增2): 753-758.  
Qi B X, Wang F, Chen J L. Numerical simulation of structural response of tunnel crossing fault under stick-slip fault dislocation [J]. Building Structure, 2020, 50(Sup 2): 753-758.
- [42] 廖少明, 侯学渊, 彭芳乐. 隧道纵向剪切传递效应及其一维解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1110-1116.  
Liao S M, Hou X Y, Peng F L. Longitudinal shear transfer of tunnel and its 1d analytical solution [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1110-1116. (in Chinese)
- [43] 工程岩体分级标准: GB 50218—2014. [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [44] 公路隧道抗震设计规范: JTG 2232—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [45] 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [46] 孙岩, 沈修志. 我国断裂构造岩分带型式的研究 [J]. 中国科学(B辑化学生物学农学医学地学), 1986(2): 195-202.  
Sun Y, Shen X Z. Research on the zoning patterns of faulted structural rocks in China [J]. Science in China (Series B: Chemistry, Biology, Agriculture, Medicine & Earth Sciences), 1986(2): 195-202. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)